

РАЗРАБОТКА И АНАЛИЗ ВЫЧИСЛИТЕЛЬНОЙ МОДЕЛИ ГЕОМЕХАНИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ “СЛОИСТЫЙ МАССИВ – КРЕПЬ ВЫРАБОТКИ”

В. Фомичев¹, В. Почепов¹, В. Лапко^{1*}, Л. Фомичева²

¹Кафедра подземной разработки месторождений, Национальный горный университет, Днепропетровск, Украина

²Кафедра высшей математики, Национальный горный университет, Днепропетровск, Украина

*Ответственный автор: e-mail vylapko@mail.ru, тел. +380562472326, факс: +380563742184

DEVELOPMENT AND ANALYSIS OF COMPUTATIONAL MODEL OF GEOMECHANICAL SYSTEM “LAYERED MASSIF – WORKING SUPPORT”

V. Fomychov¹, V. Pochepov¹, V. Lapko^{1*}, L. Fomychova²

¹Underground Mining Department, National Mining University, Dnipropetrovsk, Ukraine

²Higher Mathematics Department, National Mining University, Dnipropetrovsk, Ukraine

*Corresponding author: e-mail vylapko@mail.ru, tel. +380562472326, fax: +380563742184

ABSTRACT

Purpose. Substantiating the method for forecasting rock pressure manifestation in the system “layered massif – working support” on the basis of displacement patterns detection at any arbitrary point of the preparatory working circuit during the computational experiments.

Methods. Computational experiments were carried out on the basis of the finite element method using the solid computational domain, provided superlimiting non-linear behavior of the simulated materials. The use of numerical grid methods allows creating geometrically and physically complex simulation models and manipulate their state within a wide range.

Findings. The calculations defined that with weak links between adjacent strata, acting shear stresses destroy them in the vicinity of working, and the contiguous rock strata deform with mutual sliding. Analysis of reduced stress area allows to substantiate with accuracy sufficient for mining computations a unified average structure of the computational domain that most comprehensively reflects all the main features of a real mining massif which are likely to influence computational error. This choice ensures the introduced error value within 10% in the entire range of mechanical parameters change of the rock massif strata.

Originality. Stress-strain state of frame support and patterns of its change with increasing mining depth are non-linear, especially with nearby rock strata entering the superlimiting state; formation of the plastic hinges system along the frame support circuit, which causes the development of such replacements that exclude the possibility of further working exploitation.

Practical implications. The proposed method allows to determine the optimal indicators of maintaining a working driven in the finely-layered rock massif, which makes it possible to significantly reduce operation costs.

Keywords: working, stress-strain state, frame support, nonlinear deformation, rock massif

1. ВВЕДЕНИЕ

Стабильность функционирования угольной шахты во многом определяется состоянием подземных горных выработок, среди которых в наиболее сложных условиях эксплуатируются подготовительные выработки, особенно проводимые в слоистом массиве слабых пород, например, на шахтах Западного Донбасса. Здесь необходимость в ремонте подготовительных выработок достигает 50%, а затраты на поддержание составляют 15% в себестоимости добычи угля (Kovalevska, Illiashov, Fomichev & Chervatuk, 2010).

Поэтому обеспечение надлежащего эксплуатационного состояния подготовительных выработок шахт Западного Донбасса является важной технической задачей. В понятие “эксплуатационное состояние выработки” специалисты вкладывают комплекс вопросов, связанных в первую очередь с устойчивостью крепи, безопасностью передвижения людей и транспортных средств, надежностью схем проветривания участков шахтного поля. На основании учета данных факторов проектировщиками принимается решение о выборе наиболее рационального типового сечения выработки, для чего необходимо достаточно

надежно спрогнозировать эпюру перемещений в любой точке ее контура и оценить соблюдение комплекса конструктивно-технологических норм и требований правил безопасности.

В настоящее же время при выборе типового сечения выработки в нормативных документах перемещения ее контура принимаются усредненными и постоянными отдельно по всей длине кровли, почвы и боков без учета реально существующей неравномерной эпюры перемещений на каждом из этих участков, что усложняет эксплуатацию выработки.

Поэтому разработка методики прогноза эпюры перемещений в любой точке контура выработки для комплексной оценки ее эксплуатационного состояния и выбора на этой основе типового сечения, безусловно, актуальной является задача повышения эффективности работы угольных шахт Западного Донбасса. Такая комплексная постановка задачи требует максимально адекватного отражения процессов сдвижения слоистого массива слабых пород в окрестности подготовительной выработки (Bondarenko, Kovalevskaya, Simanovich & Fomychov, 2010). А именно: учет совместности деформирования массива и крепи реальной пространственной геометрии с межрамным ограждением и забутованным закрепным пространством; моделирование максимально приближенной к существующей структуре слоистой углевмещающей толщи с неоднородными механическими характеристиками и нарушенными контактами между слоями в окрестности выработки; учет параметров полной диаграммы деформирования каждого из элементов системы “слоистый массив – крепь подготовительной выработки” (Pavlova, 2005; Kurlenya & Oparin, 1999).

2. ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Исходя из изложенного, сформулирована конечная цель работы – обоснование методики прогноза проявлений горного давления в системе “слоистый массив – крепь выработки” на основе выявления закономерностей смещения произвольной точки контура подготовительной выработки при проведении вычислительных экспериментов.

Поскольку аналитические методы решения данной задачи не позволяют получить достаточную точность описания геомеханической системы при проектировании крепей выемочных выработок (Zhu, Jian, Ноу, Xiao & Yao, 2008), в качестве математической основы рассматриваемой методики примем метод конечных элементов (МКЭ). Использование сеточных численных методов позволяет выполнить моделирование большого числа объектов в пределах одной расчетной области, при этом манипулируют их состоянием в широких пределах.

3. ПРОВЕДЕНИЕ ВЫЧИСЛИТЕЛЬНЫХ ЭКСПЕРИМЕНТОВ

На первом этапе исследований получено решение двух основных задач: выполнено геомеханическое обоснование модели сдвижения тонкослоистого массива слабых пород в окрестности пластовой выработки (Рис. 1); проведено комплексное исследование напряженно-деформированного состояния (НДС) системы “слоистый массив – крепь подготовительной выработки” по полной диаграмме деформирования каждого из составляющих ее элементов (Oparin, Akinin, Vostrikov & Yushkin, 2003).



Рисунок 1. Структурная схема геомеханического обоснования модели деформирования системы “слоистый массив – крепь выработки”

Структура решения первой из поставленных задач состоит из трех основных этапов (Рис. 1). На первом этапе выполнено обоснование начальных и граничных условий, характерных для модели “слоистый массив – крепь подготовительной выработки”; на втором – проведение массива тестовых расчетов, определяющих величину влияния на результат различных характеристик системы; и на третьем – выполнен подбор комбинаций изменяемых характеристик системы, используемых при расчетах на втором этапе решения текущей задачи.

Таким образом, обоснован весь комплекс исходных горно-геологических и горнотехнических параметров для максимально достоверного моделирования процессов сдвижения слоистой углевещающей толщи в окрестности подготовительной выработки (Yang et al., 2011).

С учетом особенностей МКЭ и структурной сложности поставленной задачи разработана блок-

схема вычислительного эксперимента (Рис. 2), расчетная схема которого сформирована таким специфическим образом, что она проходит несколько этапов актуализации – от разработки основных расчетных элементов модели до адекватного представления о природе выполняемых расчетов.

Актуализация расчетной схемы привела к созданию объемной модели, на основе которой выполнялись все последующие исследования. Для снижения влияния граничных условий на количественные результаты вычислительного эксперимента по оси выработки моделировалось шесть рам, располагающихся на расстоянии 0.5 м друг от друга. Размеры модели выбраны с учетом минимизации взаимного влияния выработки и граничных условий на результирующие эпюры напряжений и перемещений. При этом на границах модели сохраняются исходные негидростатические условия распределения вертикальных и горизонтальных компонент напряжений.



Рисунок 2. Блок-схема постановки и проведения вычислительного эксперимента

4. РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

В ходе расчетов установлено, что при слабых связях между соседними слоями действующие касательные напряжения их разрушают в окрестности выработки и смежные породные слои деформируются с проскальзыванием друг относительно друга. Этот фактор, как видно из представленных эпюр (Рис. 3), существенно изменяет поле напряжений и учтен в результирующей модели вычислительного эксперимента.

В целом, при учете проскальзывания слоев наблюдается рост максимальных касательных напряжений в горном массиве с увеличением числа породных слоев моделируемых вблизи от контура выработки.

Анализ поля приведенных напряжений (Рис. 4) позволил с достаточной для горнотехнических расчетов точностью обосновать единую усредненную структуру расчетной области, наиболее полно отражающей все основные особенности реального горного массива в значительной степени, влияющие на погрешность проводимых расчетов. Этот выбор обеспечивает величину привносимой погрешности в пределах 10% во всем диапазоне изменения механических параметров породных слоев горного массива. Расчет, произведенный для группы тестовых моделей по вариантам размещения выработки относительно угольного пласта, позволил выбрать для расчетной модели усредненный вариант, формирующих НДС системы в пределах допустимой погрешности.

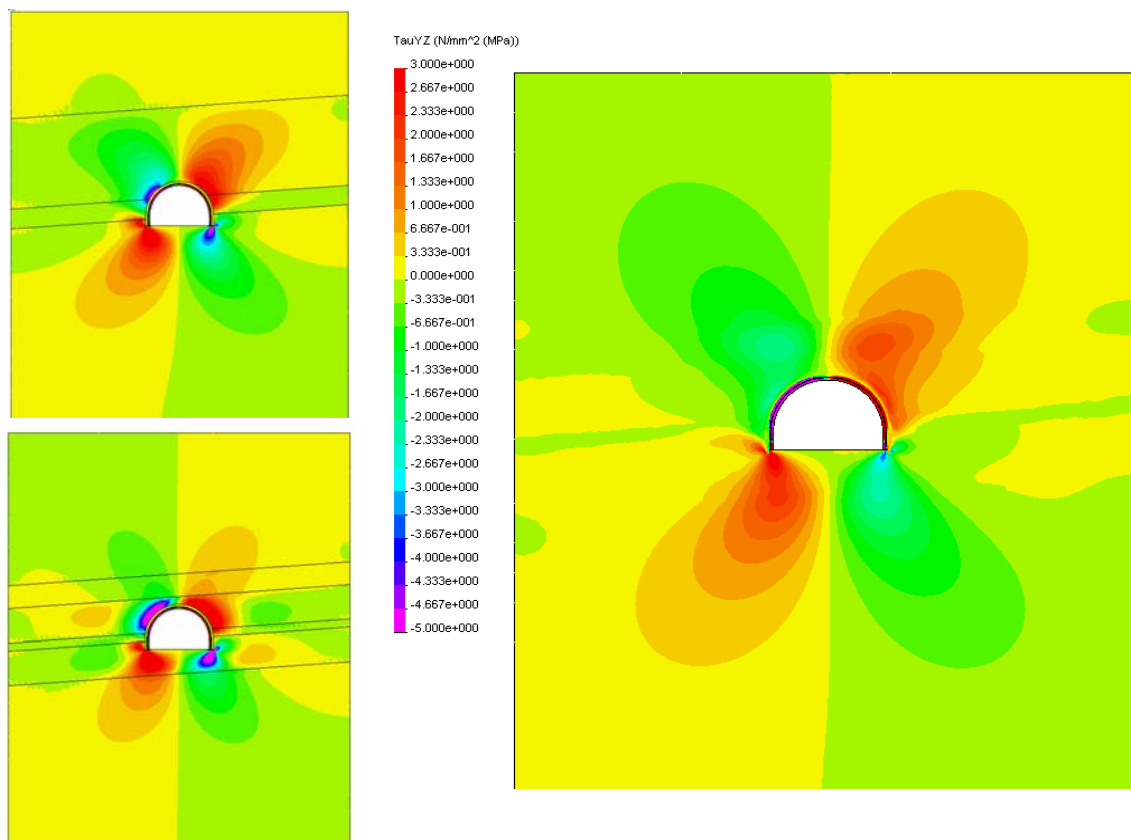


Рисунок 3. Эпюры касательных напряжений с учетом проскальзывания (две левых) и без учета проскальзывания (большая правая) породных слоев

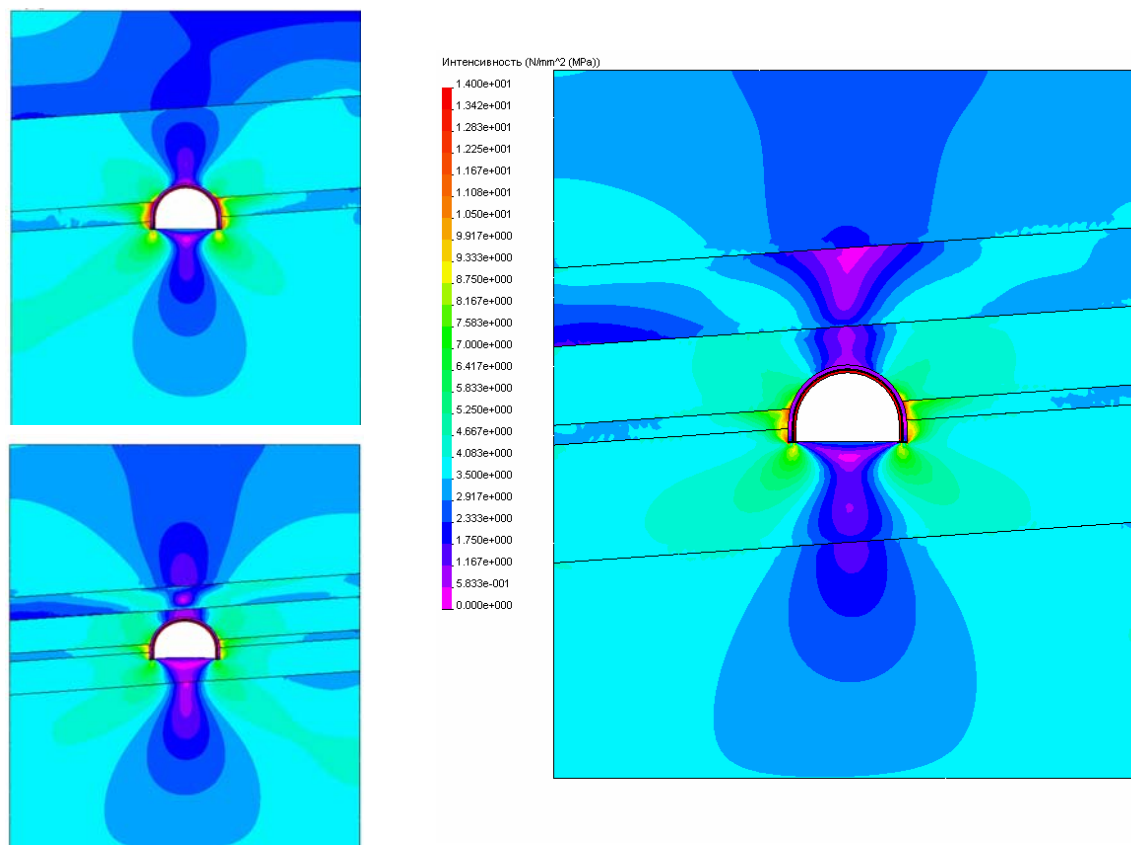


Рисунок 4. Эпюры приведенных напряжений для различных моделей вычислительного эксперимента

Анализ напряженно-деформированного состояния моделируемого угольного пласта для различных вариантов механических характеристик породных слоев показал, что в исследуемых диапазонах влияния этих параметров на состояние пласта незначительно. Значительным изменениям НДС подвергают-

ся области породного массива над и под выемочной выработкой. Причем наблюдаются изменения зон малой интенсивности напряжений в пространственном расположении до 70% высоты выработки и по величине интенсивности напряжений – до 15%.

Таблица 1. Варианты соотношения модулей деформации близлежащих породных слоев углевещающей толщи, 10^4 МПа

Вариант	Почва выработки	Свод выработки	Слой над сводом выработки	Вариант	Почва выработки	Свод выработки	Слой над сводом выработки	Вариант	Почва выработки	Свод выработки	Слой над сводом выработки
1	0.3	0.3	0.3	10	0.3	0.3	1.0	19	0.3	1.0	0.6
2	0.3	0.6	0.3	11	0.6	0.3	1.0	20	0.6	1.0	0.6
3	0.3	1.0	0.3	12	0.6	0.6	1.0	21	1.0	1.0	0.6
4	0.6	0.6	0.3	13	0.3	0.6	1.0	22	0.3	0.3	0.6
5	1.0	0.6	0.3	14	0.3	1.0	1.0	23	0.6	0.3	0.6
6	0.6	1.0	0.3	15	0.6	1.0	1.0	24	1.0	0.3	0.6
7	1.0	1.0	0.3	16	1.0	0.3	1.0	25	0.3	0.6	0.6
8	1.0	0.3	0.3	17	1.0	0.6	1.0	26	0.6	0.6	0.6
9	0.6	0.3	0.3	18	1.0	1.0	1.0	27	1.0	0.6	0.6

Несмотря на различные сочетания деформационных характеристик приведенных в Таблице 1 было установлено, что в кровле и почве выработки размеры зон предельного состояния достаточно стабильны и охватывают два породных слоя в кровле и один – в почве. В боках выработки наблюдается ярко выраженная область опорного давления от

действия сжимающих напряжений, размеры которой определяются глубиной разработки и прочностными характеристиками близлежащих породных слоев. В рамной крепи снижение приведенных напряжений происходит в случае залегания в непосредственной кровле хотя бы одного породного слоя повышенной жесткости.



Рисунок 5. Схема проведения исследования НДС модели одного породного слоя повышенной жесткости

Вторая задача исследований – расчет НДС системы “слоистый массив – крепь подготовительной выработки” (Рис. 5) – выполнена при условии нарушенных контактов между слоями и моделирования полных диаграмм деформирования всех составляющих элементов: для каждого из породных слоев и угольного пласта модели использована общепринятая в геомеханических задачах полная диаграмма, состоящая из трех линейных участков (упруго-

пластическая стадия с модулем деформации, разупрочнение с модулем спада, разрыхление на стадии “руинного” разрушения с остаточной прочностью); для рамной крепи использована реальная диаграмма нагружения стали Ст5, учитывающая площадку текучести и стадию упрочнения; полная диаграмма породной забутовки в закрепном пространстве определена на основе шахтных экспериментов.

Таблица 2. Варианты расчетного предела прочности на одноосное сжатие близлежащих породных слоев углевмещающей толщи

Вариант	$(\sigma_{сж}^n)_1$, МПа	$(\sigma_{сж}^k)_1$, МПа	$(\sigma_{сж}^k)_2$, МПа	Вариант	$(\sigma_{сж}^n)_1$, МПа	$(\sigma_{сж}^k)_1$, МПа	$(\sigma_{сж}^k)_2$, МПа	Вариант	$(\sigma_{сж}^n)_1$, МПа	$(\sigma_{сж}^k)_1$, МПа	$(\sigma_{сж}^k)_2$, МПа
1	5	5	5	10	5	5	20	19	5	20	10
2	5	10	5	11	10	5	20	20	10	20	10
3	5	20	5	12	10	10	20	21	20	20	10
4	10	10	5	13	5	10	20	22	5	5	10
5	20	10	5	14	5	20	20	23	10	5	10
6	10	20	5	15	10	20	20	24	20	5	10
7	20	20	5	16	20	5	20	25	5	10	10
8	20	5	5	17	20	10	20	26	10	10	10
9	10	5	5	18	20	20	20	27	20	10	10

Таблица 3. Варианты соотношения параметров предельного состояния близлежащих породных слоев углевмещающей толщи

Вариант	1	2	3	4	5	6	7	8
$\frac{(\sigma_{сж2}^k)^0}{\sigma_{сж2}^k}$	0.1	0.1	0.1	0.1	0.2	0.2	0.2	0.2
$\frac{(\sigma_{сж1}^k)^0}{\sigma_{сж1}^k}$	0.1	0.1	0.2	0.2	0.1	0.1	0.2	0.2
$\frac{(\sigma_{сж1}^n)^0}{\sigma_{сж1}^n}$	0.1	0.2	0.1	0.2	0.1	0.2	0.1	0.2
Вариант	1	2	3	4	5	6	7	8
$\frac{M_2^k}{E_2^k}$	0.5	0.5	0.5	0.5	3.0	3.0	3.0	3.0
$\frac{M_1^k}{E_1^k}$	0.5	0.5	3.0	3.0	0.5	0.5	3.0	3.0
$\frac{M_1^n}{E_1^n}$	0.5	3.0	0.5	3.0	0.5	3.0	0.5	3.0

При решении второй задачи были выполнены расчеты по 27 вариантам сочетаний модуля деформации близлежащих породных слоев (Табл. 1) с использованием 27 вариантов сочетаний расчетного сопротивления пород сжатию приведенных в Таблице 2. При этом для изучения влияния запредельного состояния пород на НДС системы в расчетах использовались 16 вариантов описания параметров остаточной прочности приведенных в Таблице 3.

5. АНАЛИЗ ПОЛУЧЕННЫХ РЕЗУЛЬТАТОВ

Различные сочетания прочностных и деформационных характеристик по каждому из близлежащих породных слоев обуславливают разную степень их влияния на изменение поля напряжений и перемещений с ростом глубины расположения выработки. Определяющим фактором является вид состояния близлежащих породных слоев и угольного пласта при конкретной глубине залегания (Ren & Buckeridge, 2003). При повышенных прочностных характеристиках близлежащих породных слоев их частично запредельное состояние предопределяет связь напряжений и перемещений с глубиной, близкую к линейной; вариация модуля деформации в интервале $(0.3 - 1.0) \cdot 10^4$ МПа изменяет напряжения до 55%, а перемещения до 131%.

Благодаря проскальзыванию соседних породных слоев относительно друг друга выявлена достаточная независимость поля напряжений породного слоя от вида состояния соседних слоев.

С наступлением предельного состояния хотя бы одного из близлежащих породных слоев при пониженных прочностных характеристиках зависимость НДС массива от глубины становится существенно нелинейной. В запредельном состоянии рост перемещений усиливается, а напряжений уменьшается; при этом деформационные характеристики слоев несущественно влияют на поле напряжений, а смещения контура выработки, особенно в ее почве, могут изменяться до 2.5 раз и в некоторых вариантах на глубинах $H = 500 - 600$ м происходит заполнение разупрочненной породой практически всей полости выработки.

В слоях с более высокими прочностными характеристиками поле напряжений в малой степени зависит от перехода соседнего слоя в предельное состояние, а слои пониженной прочности с увеличением глубины переходят в предельное состояние практически независимо от прочностных характеристик соседних более крепких породных слоев.

В отличие от поля напряжений, поле перемещений, особенно эпюра смещения породного контура, тесно связаны с механическими характеристиками не только исследуемого породного слоя, но и соседних слоев. В формировании перемещений участка контура выработки участвуют, все механические характеристики полной диаграммы деформирования породного слоя, примыкающего к рассматриваемому участку – деформационные характеристики оказывают влияние до 100 – 150%, а прочностные – до 6 – 8 раз в исследованном диапазоне их изменения.

Из механических характеристик соседних слоев, существенное влияние оказывают преимущественно пределы прочности на сжатие и модуль деформации, а параметры запредельного состояния влияют в меньшей степени.

Особенности развития перемещений в боках и почве выработки, охарактеризованы как действие “эффекта штампа”, когда более жесткие и менее разупрочненные вышележащие породные слои в совокупности с угольным пластом интенсифицируют процесс перемещений боков и почвы в полость выработки; этот эффект специалистами отмечался ранее в качественном плане, теперь получены конкретные количественные закономерности.

НДС рамной крепи и закономерности его изменения с ростом глубины являются нелинейными, особенно при переходе близлежащих породных слоев в запредельное состояние; образование системы пластических шарниров по контуру рамной крепи способствует (в ряде вариантов) развитию таких перемещений, которые исключают возможность дальнейшей эксплуатации выработки.

6. ВЫВОДЫ

В слоистом массиве слабых пород переход в предельное и запредельное состояния наступает в не предсказуемых по величине и расположению зонах и элементах системы “слоистый массив – крепь выработки”. Поэтому для повышения адекватности геомеханической модели НДС каждого ее элемента должно рассчитываться по полной диаграмме деформирования с учетом особенностей конкретного материала, что впервые выполнено для горно-геологических и горнотехнических условий Западного Донбасса и позволяет глубже раскрыть механизм развития геомеханических процессов в окрестности выемочной выработки.

Выявлено, что относительная независимость деформирования породных слоев при их проскальзывании друг относительно друга в окрестности выработки порождает высокую степень независимости поля напряжений отдельного породного слоя от вида состояния соседних слоев, что интенсифицирует развитие перемещений контура крепи выработки.

БЛАГОДАРНОСТЬ

Данная работа была бы невозможна без поддержки ООО “ДТЭК Энерго”. Приведенные исследования выполнялись в рамках государственной научно-исследовательской тематики. Авторы работы выражают признательность профессорам Национального горного университета Владимиру Бондаренко и Ирине Ковалевской за поддержку в проведении исследований.

REFERENCES

- Bondarenko, V., Kovalevska, I., Simanovich, G., & Fomychov, V. (2010). Tendentsii izmeneniya napryazhennogo sostoyaniya slabykh porod krovli plastovoy vyrabotki. In *Forum hirnykiv* (pp. 183-188). Dnipropetrovsk: Natsionalnyi hirnychiy universytet.

- Kovalevska, I., Iliashov, M., Fomychov, V., & Chervatuk, V. (2012). The formation of the finite-element model of the system "undermined massif – support of stope". *Geomechanical Processes during Underground Mining: School of Underground Mining 2012*, 73-79.
<http://dx.doi.org/10.1201/b13157-13>
- Kurlenya, M.V., & Oparin, V.N. (1999). Problems of nonlinear geomechanics. Part 1. *Journal of Mining Science*, 35(3), 216-230.
<http://dx.doi.org/10.1007/bf02550237>
- Oparin, V.N., Akinin, A.A., Vostrikov, V.I., & Yushkin, V.F. (2003). Nonlinear Deformation Processes in the Vicinity of Mine Workings. Part I. *Journal of Mining Science*, 39(4), 315-322.
<http://dx.doi.org/10.1023/b:jomi.0000023182.34424.9e>
- Pavlova, L. (2005). *Modelirovanie geomekhanicheskikh protsessov v razrushaemom ugleporodnom massive*. Novokuznetsk: Sibirskiy gosudarstvennyy industrial'nyy universitet.
- Ren, G., Li, J., & Buckeridge, J. (2010). Calculation of mining subsidence and ground principal strains using generalized influence function method. *Mining Technology*, 119(1), 34-41.
<http://dx.doi.org/10.1179/037178410x12698490396994>
- Yang, W., Lin, B., Qu, Y., Li, Z., Zhai, C., Jia, L., & Zhao, W. (2011). Stress evolution with time and space during mining of a coal seam. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 48(7), 1145-1152.
<http://dx.doi.org/10.1016/j.ijrmmms.2011.07.006>
- Zhu, S., Jian, Z., Hou, H., Xiao, W., & Yao, P. (2008). Analytical model and application of stress distribution on mining coal floor. *Journal of China University of Mining and Technology*, 18(1), 13-17.
[http://dx.doi.org/10.1016/s1006-1266\(08\)60003-6](http://dx.doi.org/10.1016/s1006-1266(08)60003-6)

ABSTRACT (IN RUSSIAN)

Цель. Обоснование методики прогноза проявлений горного давления в системе "слоистый массив – крепь выработки" на основе выявления закономерностей смещения произвольной точки контура подготовительной выработки при проведении вычислительных экспериментов.

Методика. Проведение вычислительных экспериментов было выполнено на основе метода конечных элементов с использованием объемной расчетной области при условии запредельного нелинейного поведения моделируемых материалов. Применение сеточных численных методов позволяет создавать геометрически и физически сложные расчетные модели и при этом манипулировать их состоянием в широких пределах.

Результаты. В результате расчетов установлено, что при слабых связях между соседними слоями, действующие касательные напряжения их разрушают в окрестности выработки, и смежные породные слои деформируются с проскальзыванием друг относительно друга. Анализ поля приведенных напряжений позволил с достаточной для горнотехнических расчетов точностью обосновать единую усредненную структуру расчетной области, наиболее полно отражающей все основные особенности реального горного массива, влияющие на погрешность проводимых расчетов. Этот выбор обеспечивает величину привносимой погрешности в пределах 10% во всем диапазоне изменения механических параметров породных слоев горного массива.

Научная новизна. Напряженно-деформированное состояние рамной крепи и закономерности его изменения с ростом глубины являются нелинейными, особенно при переходе близлежащих породных слоев в запредельное состояние; образование системы пластических шарниров по контуру рамной крепи способствует развитию таких ее перемещений, которые исключают возможность дальнейшей эксплуатации выработки.

Практическая значимость. Выработанная методика позволяет определять оптимальные показатели поддержания горной выработки, пройденной в мелкослоистом породном массиве, что позволяет существенно снизить эксплуатационные затраты.

Ключевые слова: горная выработка, напряженно-деформированное состояние, рамная крепь, нелинейные деформации, породный массив

ABSTRACT (IN UKRAINIAN)

Мета. Обґрунтування методики прогнозу проявів гірського тиску в системі "шаруватий масив – кріплення виробки" на основі виявлення закономірностей зсуву довільної точки контуру підготовчої виробки при проведенні обчислювальних експериментів.

Методика. Проведення обчислювальних експериментів було виконано на основі методу кінцевих елементів з використанням об'ємної розрахункової області за умови поза межнього нелінійного поведіння матеріалів, що моделюються. Застосування сіткових чисельних методів дозволяє створювати геометрично й фізично складні розрахункові моделі й при цьому маніпулювати їх станом у широких межах.

Результати. У результаті розрахунків встановлено, що при слабких зв'язках між сусідніми шарами, діючі дотичні напруження їх руйнують в околиці виробки, і суміжні породні шари деформуються із проковзуванням один щодо одного. Аналіз поля наведених напруг дозволив з достатньою для гірничотехнічних розрахунків точністю обґрунтувати єдину усереднену структуру розрахункової області, що найбільше повно відбиває всі основні особливості реального гірського масиву, що впливають на погрішність проведених розрахунків. Цей вибір забезпечує величину погрішності, що привноситься, у межах 10% у всьому діапазоні зміни механічних параметрів породних шарів гірського масиву.

Наукова новизна. Напружено-деформований стан рамного кріплення та закономірності його зміни з ростом глибини є нелінійними, особливо при переході прилеглих породних шарів у поза межній стан; утворення системи пластичних шарнірів по контурі рамного кріплення сприяє розвитку таких її переміщень, які виключають можливість подальшої експлуатації виробки.

Практична значимість. Створена методика дозволяє визначити оптимальні показники підтримки гірничої виробки, яку пройдено в дрібношаруватому породному масиві, що дозволяє істотно знизити експлуатаційні витрати.

Ключові слова: *гірнична виробка, напружено-деформований стан, рамне кріплення, нелінійні деформації, породний масив*

ARTICLE INFO

Received: 2 February 2016

Accepted: 12 April 2016

Available online: 30 June 2016

ABOUT AUTHORS

Vadym Fomychov, Doctor of Technical Sciences, Professor of the Underground Mining Department, National Mining University, 19 Yavornytskoho Ave., 4/60, 49005, Dnipropetrovsk, Ukraine. E-mail: fomichov@inbox.ru

Viktor Pocheпов, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Underground Mining Department, National Mining University, 19 Yavornytskoho Ave., 4/58, 49005, Dnipropetrovsk, Ukraine. E-mail: vnpocheпов@mail.ru

Viktor Lapko, Assistant Professor of the Underground Mining Department, National Mining University, 19 Yavornytskoho Ave., 4/58, 49005, Dnipropetrovsk, Ukraine. E-mail: vvlapko@mail.ru

Liudmyla Fomychova, Candidate of Technical Sciences, Professor of the Higher Mathematics Department, National Mining University, 19 Yavornytskoho Ave., 5/25a, 49005, Dnipropetrovsk, Ukraine. E-mail: lyfomichova@mail.ru